

SONDERFORSCHUNGSBEREICH BRANDVERHALTEN VON BAUTEILEN

DER SPRECHER : o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. K. Kordina

Ein Beitrag zur
Ermittlung der Brandraumtemperaturen
aufgrund von Wärmebilanzrechnungen

von

o. Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

Dr.-Ing. A. Haksever, Dr.-Ing. habil. U. Schneider

1980

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Verzeichnis der verwendeten Bezeichnungen

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Dimension</u>
A_w	Summe aller Fensteröffnungen	m^2
B_L	Fensterbreite bei Frischluftzufuhr	m
B_B	Fensterbreite bei Austritt der heißen Gase	m
c_{po}	Spez. Wärmekapazität für Luft	$MJ/kg \text{ } ^\circ C$
c_{pg}	" " der heißen Gase	$MJ/kg \text{ } ^\circ C$
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
H_B	Energie, die von den Gasmassen im Brandraum gespeichert wird	MJ/h
H_C	Energie, die im Brandraum frei wird	MJ/h
H_L	Energie, die den Brandraum durch Konvektion verläßt	MJ/h
H_w	Energie, die von den Bauteilen des Brandraums aufgenommen wird	MJ/h
H	Fensterhöhe	m
H_R	Strahlungsenergiemenge, die durch die Fensteröffnungen entzogen wird	MJ/h
H_u	Heizwert der Brandlasten	MJ/kg
M_B	Rauchgasmenge	kg/h
M_L	Frischluftmenge	kg/h
R	Abbrandrate	kg/h
T	Temperatur	$K, \text{ } ^\circ C$
T_g	Gastemperaturen im Brandraum	$K, \text{ } ^\circ C$
T_o	Lufttemperatur	$K, \text{ } ^\circ C$
T_w	Oberflächenwandtemperatur	$K, \text{ } ^\circ C$
V_B	Volumen des Brandraums	m^3
W	Brandraumoberflächen	m^2
μ_L	Kontraktionskoeffizient bei Frischluftzufuhr	1
ΔH_C	Heizwert der Brandlasten	MJ/kg

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Dimension</u>
μ_B	Kontraktionskoeffizient beim Austritt der heißen Gase	1
y^u	Abstand zwischen Nulllinie und Fensterunterkante	m
y^o	Abstand zwischen Nulllinie und Fensteroberkante	m
α	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	MJ/h m ² °C
$\bar{\alpha}$	Verbrennungsfaktor	1
ε	Emissionszahl	1
σ	Stephan-Boltzmann-Konstante	MJ/h K ⁴
ρ_o	Luftdichte	kg/m ³
ρ_g	Rauchgasdichte	kg/m ³
λ	Wärmeleitzahl	MJ/h m °C

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Problemstellung	2
2. Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Temperaturen in kleinen Räumen im Falle eines Brandes	3
2.1 Stand der Erkenntnisse	3
2.2 Grundlagen der Wärmebilanzrechnungen	3
2.3 Nachrechnung von Brandversuchen	10
3. Zusammenfassung	12
4. Literatur	13

1. Einleitung

1.1 Zielsetzung

Für die überwiegende Mehrzahl aller Bauwerke, insbesondere für Wohngebäude, legen die Bauordnungen und die baupolizeilichen Bestimmungen die Brandschutzmaßnahmen fest; es werden für die einzelnen Bauteile bestimmte Feuerwiderstandsklassen vorgeschrieben, die auf der Grundlage der Einheits-Temperatur-Zeitkurve [1] nachzuweisen sind.

Im Industriebau [2] und für die Beurteilung von Sonderfällen [19] befriedigt dieses Verfahren nicht. Hier ist es erforderlich, den wahrscheinlichen Brandverlauf so wirklichkeitsnah wie möglich rechnerisch zu erfassen und die Bauteile - auch nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten - so zu entwerfen, daß sie sich diesem Brandangriff gegenüber unter Wahrung der vorgegebenen Sicherheitsanforderungen optimal verhalten.

Bild 1.1 zeigt den Verlauf eines natürlichen Brandes mit Entzündungs-, Brenn- und Abkühlphase

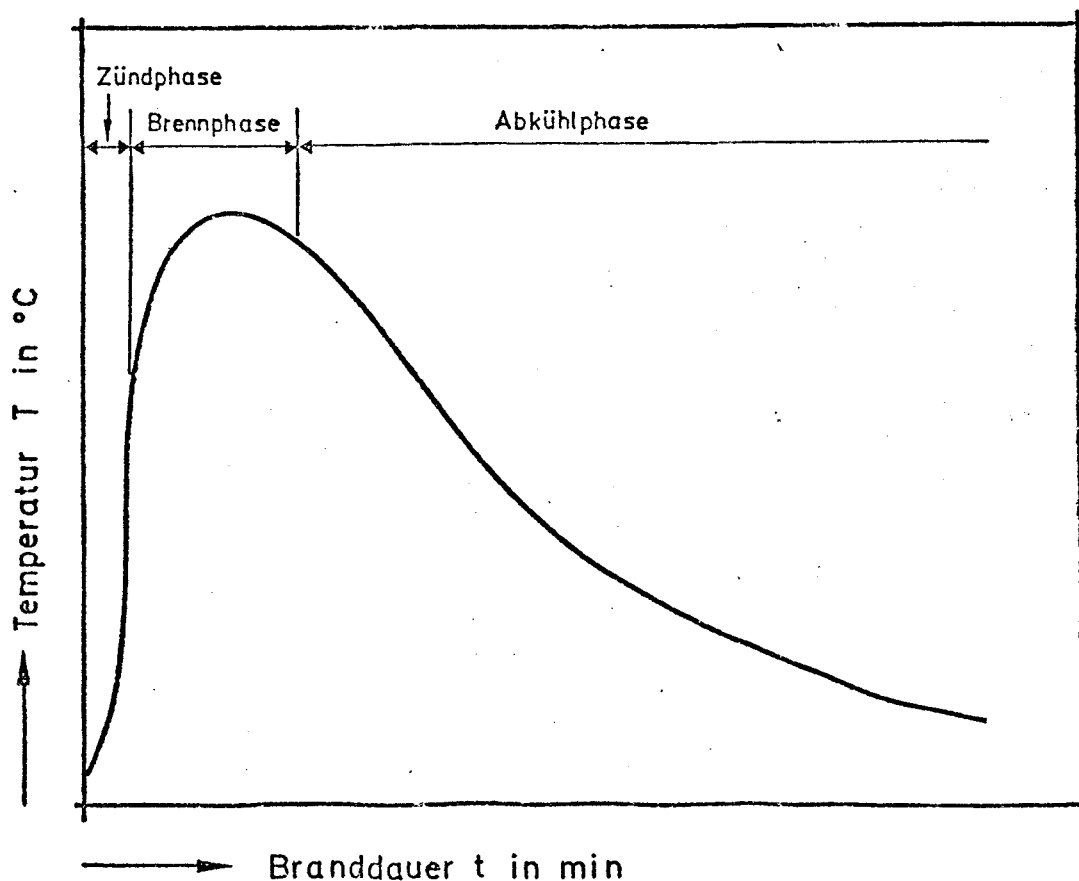


Bild 1.1 Verlauf eines natürlichen Brandes

Es geht somit in erster Linie darum, die mittleren Brandraumtemperaturen in einem beliebigen Brandraum unter Berücksichtigung von Menge, Art und Verteilung der Brandlasten sowie der Ventilationsbedingungen zuverlässig vorhersagen zu können.

1.2 Problemstellung

Die Vorhersage der mittleren Brandraumtemperaturen in einem beliebigen Bauwerk im Falle eines Schadensfeuers ist außerordentlich schwierig. Am Brandgeschehen sind verschiedene Einflußgrößen direkt oder indirekt beteiligt [3]. Eine rechnerische Bestimmung der zeitabhängigen Brandraumtemperaturen unter Erfassung annähernd aller Parameter erschien lange Zeit unmöglich. Erst mit der Entwicklung der Großrechenanlagen haben sich Möglichkeiten ergeben, trotz großer Schwierigkeiten eine Computer-Simulation des Brandgeschehens mit erträglichem Zeit- und Kostenaufwand zu erstellen.

Die rechnerische Bestimmung der mittleren Brandraumtemperaturen unter Berücksichtigung der wichtigsten Parameter ist Bestandteil eines größeren Forschungsprogramms, welches am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der technischen Universität Braunschweig erarbeitet wird [4]. Dieses Forschungsprogramm, das auf die Erstellung von Wärmebilanzmodellen abzielt, läßt sich in vier Abschnitte einteilen:

1. Brandgeschehen in Räumen mit Fensteröffnungen und homogener Temperaturverteilung,
2. Brandgeschehen in Räumen mit Fenster- und Dachöffnungen und homogener Temperaturverteilung,
3. Brandgeschehen in Räumen mit Fenster- und Dachöffnungen und homogener Temperaturverteilung,
4. Brandgeschehen in Räumen mit Fenster- und Dachöffnungen mit mehrzonaler Temperaturverteilung.

In der erstgenannten Arbeitsphase wird die homogene Temperaturverteilung in kleinen und großen Brandräumen in Abhängigkeit von den vorhandenen Brandlasten, Ventilationsbedingungen und der Geometrie des Brandraums rechnerisch ermittelt.

Die wichtigsten Grundlagen und die Randbedingungen einer solchen Wärmebilanzrechnung werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert.

2. Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Temperaturen in kleinen Räumen im Falle eines Brandes

2.1 Stand der Erkenntnisse

Das hier anstehende Problem wurde erstmalig in den fünfziger Jahren von Kawagoe [3] theoretisch behandelt. Seine Arbeiten waren von richtungsweisender Bedeutung; es gelang ihm, trotz fehlender rechentechnischer Möglichkeiten ein Modell der Energiefreisetzung zu entwickeln und brauchbare Lösungen zu erzielen.

Die - viele Jahre später - von Ödeen [5] und Magnusson [6] vorgeschlagenen Lösungswege gehen auf die heute bereits als klassisch angesehenen Vorstellungen von Kawagoe zurück.

Wesentliche Verbesserungen wurden durch die neueren Arbeiten von Thomas [7], Babrouskas [8], Böhm [18] und Harmathy [10] erarbeitet. Während Thomas einen stationären Zustand zugrunde legt, versucht Böhm, die notwendigen Wärmebilanzgleichungen des instationären Zustands unter der Voraussetzung einer konstanten Massenströmung iterativ zu lösen.

Entsprechende neuere Berichte liegen auch von Quientiere [11], Tanka [12] und Hasemi [13] vor. Diese Arbeiten zeigen jedoch, daß mit zunehmender Verfeinerung der Wärmebilanzmodelle der mathematische Aufwand überproportional ansteigt. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn - wie in [13] - die Massenströmung mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichung bestimmt wird.

In der Bundesrepublik Deutschland liegen zur Zeit neben [4] keine weiteren Informationen vor.

2.2 Grundlagen der Wärmebilanzrechnungen

Die theoretische Behandlung der Wärme- und Stofftransportgleichungen werden über Wärme- (I. Hauptsatz der Thermodynamik) und Massenbilanzen durchgeführt.

Die infolge des Abbrennens der Brandlasten freiwerdende Energie wird zu einem Teil in heiße Gase verwandelt und strömt durch die vorhandenen Fensteröffnungen hinaus, zum anderen Teil wird sie von den in Brandraum vorhandenen Massen aufgenommen. Es wird vorausgesetzt, daß

- die Temperaturverteilung im Innern des Raumes homogen ist und
- die Wärmeverluste in den umschließenden Bauteilen des Brandraums als eindimensional beschrieben werden können.

Für die Wärmebilanz des Brandraums kann daher Gleichung (2.1) aufgestellt werden:

$$H_C = H_L + H_W + H_R + H_B \quad (2.1)$$

Die Terme der Gl. (2.1) erfassen weitgehend die Energieanteile, mit denen der Brand beschrieben wird. Sie können wie folgt definiert werden:

H_C	Energiemenge, die im Brandfall frei wird,
H_L	Energiemenge, die durch den Austausch der heißeren und kühleren Gasmengen durch die Fensteröffnungen nach außen strömt,
H_W	Energiemenge, die von Wänden und Decke des Brandraums und von den im Brandraum vorhandenen weiteren Bauteilen aufgenommen wird,
H_R	Strahlungsenergie, die durch die Fensteröffnungen abgeleitet wird, und
H_B	Energiemenge, die von den Gasmassen im Brandraum gespeichert wird.

Die zugehörige Gleichung der Massenbilanz zu Gl. (2.1) im Brandraum lautet:

$$M_B - (M_L + R) = 0 \quad (2.2)$$

wobei hier M_B die durch die Öffnungen aus dem Brandraum hinausströmende Rauchgasmenge, M_L die Frischluftzufuhr und R die Masse der Verbrennungsprodukte beschreiben.

Alle diese Energie- und Massenanteile gelten für eine bestimmte Zeiteinheit. Die Ansätze werden im Bild 2.1 schematisch verdeutlicht.

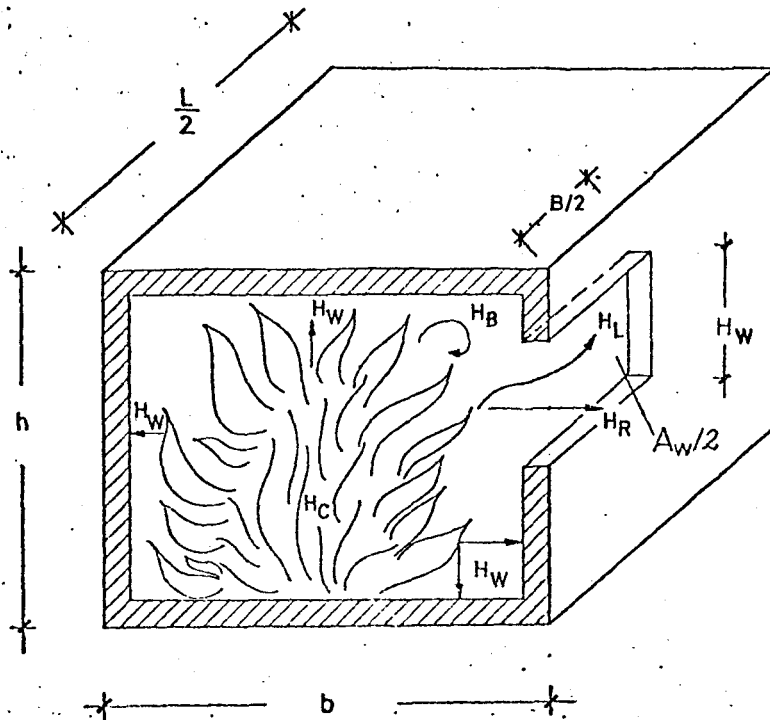


Bild 2.1 Schematische Darstellung der Energieterme der Bilanzgleichung

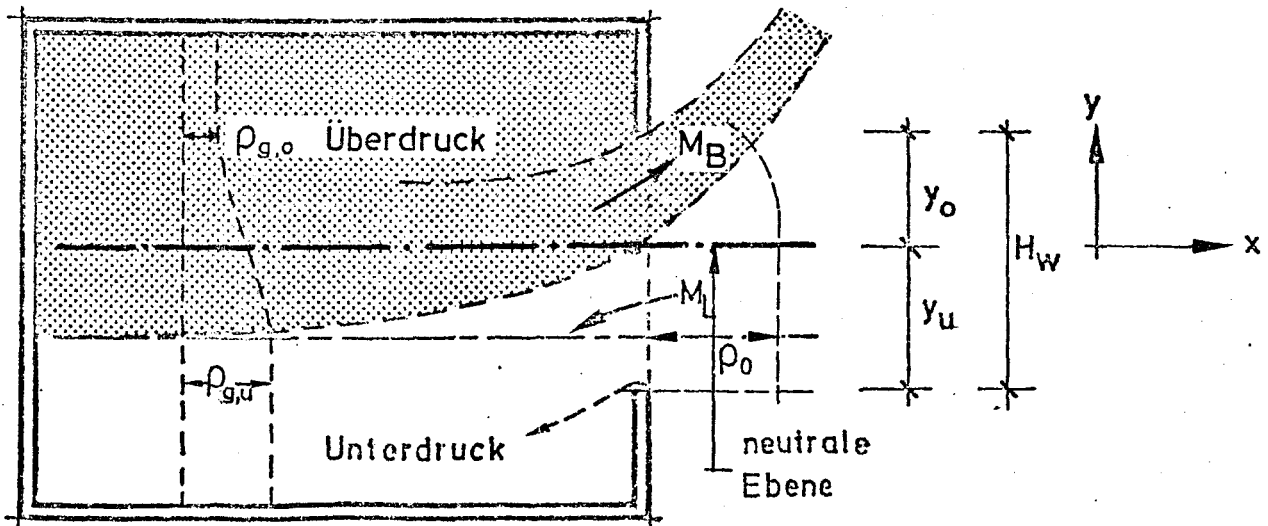


Bild 2.2 Bestimmung der neutralen Ebene

Die durch die Öffnung ein- und ausströmenden Luft- und Gasmengen werden im allgemeinen nach der Bernoulligleichung durch die neutrale Ebene bestimmt (vergl. Bild 2.2). Nach Bernoulli können die folgenden Beziehungen geschrieben werden:

$$M_L = \mu_L \cdot B_L \cdot \xi_O \int_0^{y^u} \sqrt{2g \cdot y \frac{(\xi_O - \xi_g)}{\xi_O}} dy \quad (2.3)$$

$$M_B = \mu_B \cdot B_B \cdot \xi_g \int_0^{y^o} \sqrt{2g \cdot y \frac{(\xi_O - \xi_g)}{\xi_O}} dy \quad (2.4)$$

wobei hier μ_i der Kontraktionskoeffizient ist und B die Fensterbreite angibt. Die Rauchgasdichte wird mit Gleichung (2.5) bestimmt.

$$\xi_g = \frac{\xi_O \cdot T_O}{T_g} \quad (2.5)$$

Setzt man die Gleichungen (2.3) und (2.4) in (2.2) ein, so erhält man eine Beziehung zur Bestimmung der neutralen Ebene. In Gleichung (2.2) kann neben der stöchiometrischen Verbrennung ebenso eine nicht stöchiometrische Verbrennung berücksichtigt werden.

Die Energiemenge, die durch den Austausch der heißeren mit den kühleren Gas-
mengen aus dem Brandraum herausgeführt wird, ist nach Gleichung (2.6) zu ermitteln.

$$H_L = - M_L \cdot c_{po} (T_g - T_O) + M_B \cdot c_{pg} (T_g - T_O) \quad (2.6)$$

wobei c_p die spezifische Wärmekapazität der Gase bezeichnet.

Die Strahlungsenergie der heißen Gase aus dem Brandraum wird in Übereinstimmung mit der Literatur nach Gleichung (2.7) ermittelt:

$$H_R = A_w \cdot \sigma \cdot [(T_g)^4 - (T_O)^4] \quad (2.7)$$

In Gleichung (2.7) steht σ für die Stephan-Boltzmann-Konstante, während A_w die vertikale Fensteröffnung darstellt.

Die Energiemenge, die von den Wänden des Brandraums und von den im Brandraum vorhandenen anderen Bauteilen infolge Konvektion auch Strahlung aufgenommen wird, resultiert dabei aus der Gleichung (2.8):

$$H_w = \sum_j W_j [\alpha_j (T_g - T_{wj}) + \varepsilon \cdot \sigma (T_g^4 - T_{wj}^4)] \quad (2.8)$$

Ein Teil der Wärmeenergie, der von den Umfassungswänden aufgenommen worden ist, wird auf der dem Feuer abgekehrten Seite in die Umgebung geleitet und infolge von Konvektion und Wärmestrahlung, ähnlich wie in Gl. (2.8), berücksichtigt, um die Bauteiltemperaturen bestimmen zu können. In Gleichung (2.8) repräsentieren

W_j	Größe der Wandoberfläche
α_j	konvektiver Wärmeübergang
ε	Emissionszahl der Gase
T_{wj}	Oberflächentemperaturen der Wand j an der Innenseite des Brandraums

Die in Gleichung (2.8) vorhandene Größe T_{wj} soll hier als zusätzlicher unbekannter Parameter behandelt werden. Die instationäre Temperaturverteilung in den umfassenden Bauteilen wird unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen nach der Fouriergleichung ermittelt.

$$(c_p \cdot \rho)_w \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div } \lambda_w (\text{grad } T) \quad (2.9)$$

Die Lösung der Gleichung (2.9) erfolgt hier für das vorliegende Problem unter Berücksichtigung eindimensionaler Wärmeübergangsbedingungen.

Die mathematische Behandlung der Gleichung (2.9) ist in der einschlägigen Literatur eingehend erörtert [14, 15].

In dieser Arbeit wird ein eindimensionales Diskretisierungsverfahren für die wandartigen Bauteile verwendet und die instationäre Temperaturverteilung im Querschnitt durch eine explizite Lösungsprozedur der Gleichung (2.9) bestimmt [16]. Der explizite Lösungsweg erfordert jedoch zum Teil kleine Zeitschritte zur Bestimmung

der Temperaturverteilung im Querschnitt, weil in Gleichung (2.9) die Stabilitätsbedingungen in den kritischen Diskretisierungspunkten einzuhalten sind. Da jedoch im Brandfall ohnehin mit sehr kleinen Zeitschritten sowohl aus mathematischen als auch mechanischen Gründen zu rechnen ist, bereitet der explizite Lösungsweg keine Konvergenzschwierigkeiten.

Letztlich kann im Zeitintervall Δt die im Brandraum von den Gasmassen gespeicherte Energiemenge nach Gleichung (2.10) berechnet werden:

$$H_B = V_B \cdot \rho_g \cdot c_{pg} \cdot \Delta T_g / \Delta t \quad (2.10)$$

Bei kleinen Brandräumen ist H_B vernachlässigbar, im Fall einer raschen Aufheizung der Gase und bei größeren Brandräumen ist H_B jedoch zu berücksichtigen. In dieser Arbeit wurde H_B bei der Aufstellung der Energiebilanzgleichungen berücksichtigt, da bei einem später zu untersuchenden Bauobjekt ein größerer Brandraum in seiner Speicherwirkung nicht vernachlässigt werden kann.

Weitere Energieträger, die als Energiespender in Betracht kommen könnten (z. B. Vergasung des Brandguts) wurden vernachlässigt.

Die angegebenen Gleichungen (2.3) bis (2.10) können jetzt in die Gleichungen der Energie- und Massenbilanzen eingesetzt werden. Die Gleichung (2.1) läßt sich dann zu Gleichung (2.11) umformen:

$$\begin{aligned} H_C = & (M_L + R) \cdot c_{pg} \cdot (T_g - T_O) + A_w \cdot \sigma (T_g^4 - T_O^4) \\ & + \sum_{j=1}^n W_j [\alpha_j (T_g - T_{wj}) + \epsilon_j \cdot \sigma (T_g^4 - T_{wj}^4)] \\ & + V_B \cdot \rho_g c_{pg} \cdot \Delta T_g / \Delta t \end{aligned} \quad (2.11)$$

und aus Gleichung (2.2) ergibt sich Gleichung (2.12)

$$M_L = \frac{2}{3} \cdot \mu (A_w \sqrt{H_w}) \cdot \xi_O \frac{[2g (1 - \xi_g / \xi_O)]^{1/2}}{[1 + (\frac{\xi_O}{\xi_g})^{1/3} \cdot (\frac{M_L + R}{M_L})^{2/3}]^{3/2}} \quad (2.12)$$

wobei für die Energiefreisetzung folgende Ausdrücke in Gleichung (2.11) eingesetzt werden:

$$H_c = \begin{cases} M_L \cdot \Delta H_c / r, & \text{wenn } \bar{\alpha} = \frac{r \cdot R}{M_L} > 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$H_c = \begin{cases} R \cdot \Delta H_c, & \text{wenn } \bar{\alpha} = \frac{r \cdot R}{M_L} < 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

In Gleichung (2.13) bedeutet H_u die Energiemenge, die bei der Verbrennung pro kg Brennstoff freigesetzt wird, während r die erforderliche Luftmenge beschreibt, die bei stöchiometrischer Verbrennung benötigt wird. Das in Gleichung (2.12) aufgeführte Werteprodukt $A_w \sqrt{H}$ wird in der einschlägigen Literatur als fiktiver Ventilationsfaktor genannt. Wenn die Ventilation eines Brandraums durch mehrere Fensteröffnungen gewährleistet wird, ermittelt man den fiktiven Ventilationsfaktor nach einer Näherungsbeziehung, Gl. (2.15):

$$(A_w \sqrt{H}) = \sqrt{(\sum A_i) (\sum A_i \cdot H_i)} \quad (2.15)$$

Die Lösung des Wärmebilanzproblems wird somit auf die Simultanlösung der beiden Gleichungen (2.11) und (2.12) zurückgeführt.

Als Lösungsprodukte sind dabei die Frischluftzufuhr M_L und die Brandraumtemperatur T_g anzusehen.

Das Lösungsverfahren erfordert eine Iterationsprozedur. Diese Prozedur basiert auf der Darstellung der Wärme- und Massenbilanzgleichungen als Taylorsche Reihen:

$$\begin{aligned} f(T_g, M_L) - f(\bar{T}_g, \bar{M}_L) &= \Delta f \\ \frac{1}{1!} \left\{ \frac{\partial f}{\partial T_g} \cdot \xi + \frac{\partial f}{\partial M_L} \cdot \eta \right\} + \\ \frac{1}{2!} \left\{ \frac{\partial^2 f}{\partial T_g^2} \cdot \xi^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial T_g \partial M_L} \xi \eta + \frac{\partial^2 f}{\partial M_L^2} \eta^2 \right\} &\dots \end{aligned} \quad (2.16)$$

Nach hinreichenden Iterationsschritten sollen im Limitzustand

$$\Delta f \rightarrow 0 \quad (2.17)$$

und

$$T_g = \bar{T}_g + \sum_i^n \xi \quad (2.18)$$

sowie

$$M_L = \bar{M}_L + \sum_i^n \eta \quad (2.19)$$

sein.

Die Lösung der Gleichungen (2.11) und (2.12) nach dem oben umrissenen Verfahren erfolgt programmgesteuert. Im allgemeinen wird nach 3 bis 4 Iterationsschritten die Lösung gefunden. Das Iterationsverfahren wird unter Berücksichtigung der Stabilitätskriterien der Fourierrechnung mit 10 bis 20 Sekunden Abstand durchgeführt.

2.3 Nachrechnung von Brandversuchen

Die Aussagegenauigkeit des hier vorgestellten Wärmebilanzmodells soll anhand eines Beispiels dargestellt werden. Die hier erzielten Rechenergebnisse stellen einen Mittelwert hinsichtlich der aufgetretenen Übereinstimmung zwischen Nachrechnung und Versuch dar. Mit dem vorliegenden Rechenprogramm konnten die in Metz [17] und Lyngby [18] gewonnenen Versuchsergebnisse zum größten Teil mit guter Übereinstimmung nachgerechnet werden. Die vollständigen Ergebnisse dieser Versuchsnachrechnungen wurden in [4] eingehend analysiert und diskutiert.

Bild 2.3 zeigt eine Brandkammer, deren Wände aus Gasbetonblöcken bestehen. Als Brandgut wurden in diesem Versuch Kunststoffe verwendet. Als Ventilationsbedingung wurde von Bøhm [18] eine Zwangsluftzufuhr vorgegeben. Die resultierende fiktive Ventilation nach Gleichung (2.15) wurde aus den gemessenen Luftströmungen ermittelt.

In der Berechnung wurde der Heizwert von Polyäthylen mit $H_u = 10.335 \text{ kcal/kg}$ angesetzt. Diese Angabe entspricht in etwa einer Holzbrandlast von 22 kg/m^2 . Aus Bild 2.3 wird ersichtlich, daß im Brandraum bis etwa 8 min Branddauer ausreichend Sauerstoff vorhanden ist und der Brand als brandlastkontrolliert angesehen werden kann. Danach tritt Luftmangel auf, ein Vorgang, der einen lüftungskontrollierten Brand anzeigt. Erst nach 30 min Branddauer gibt es wieder Sauerstoffüberschuß in der Brandkammer. Aus Bild 2.3 wird deutlich, daß die gemessenen Temperaturen rechnerisch befriedigend nachvollzogen werden konnten. Die erzielte Übereinstimmung wird bei der Abgrenzung der Brandphasen - Zündungs-, Brenn- und Abkühlphase - besonders erkennbar. Die Effektivität der theoretischen und rechentechnischen Ansätze lassen kaum weitere Verbesserungen im Wärmebilanzmodell erwarten.

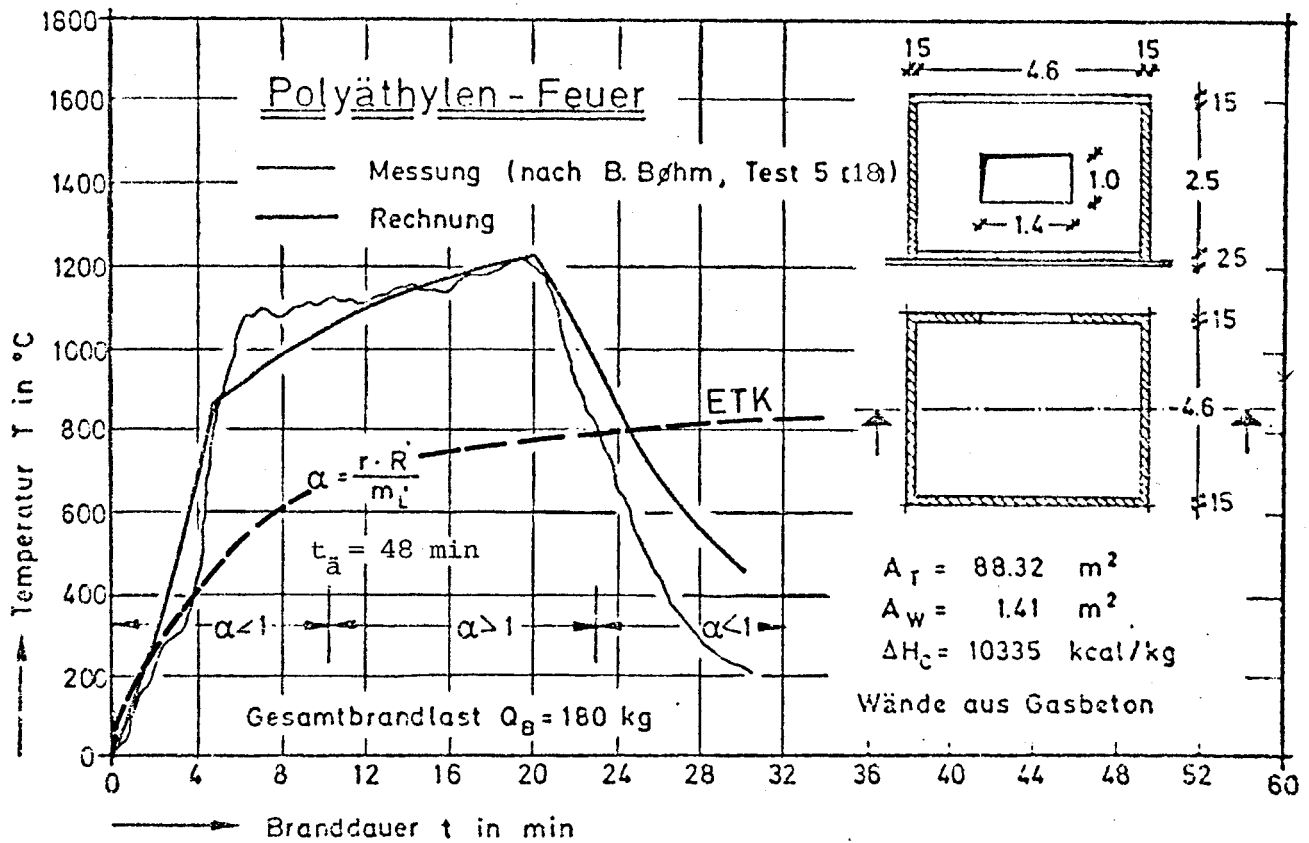


Bild 2.3 Gemessene und gerechnete Temperaturen eines Polyäthylen-Feuerversuchs

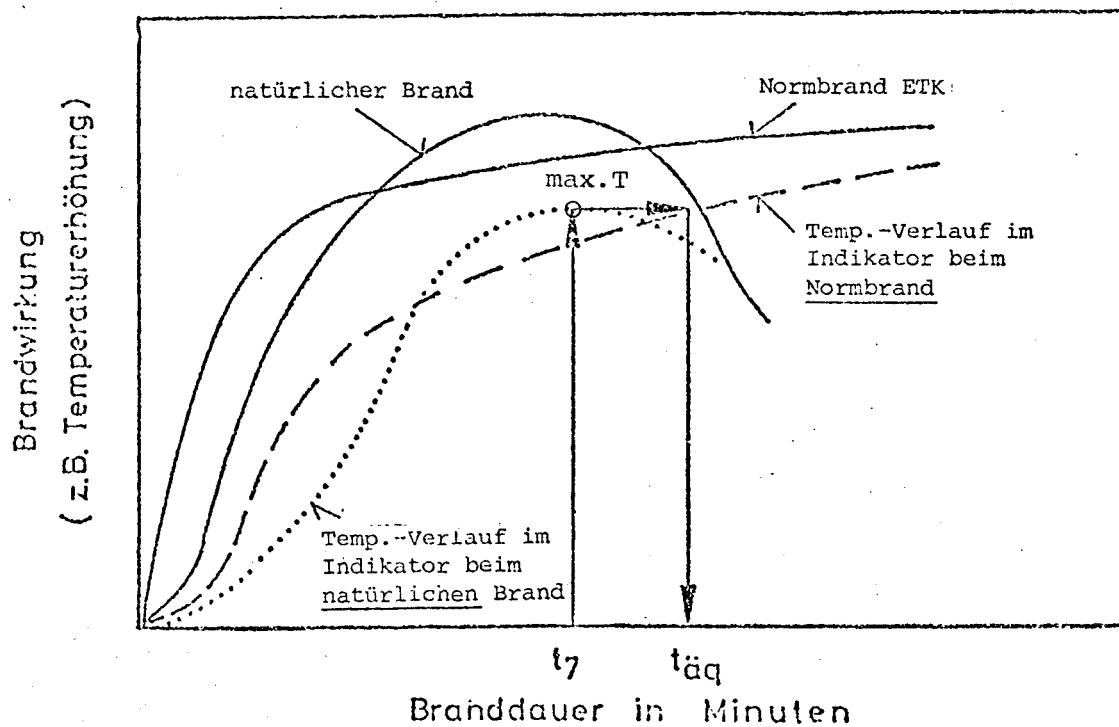


Bild 2.4 Bestimmung der äquivalenten Branddauer nach einem Temperaturkriterium

Auf Bild 2.3 ist außerdem die rechnerisch ermittelte äquivalente Branddauer des Versuchsbrandes angegeben.

Nach DIN 18 230 Teil 1 wird vor allem ein Temperaturkriterium zur Bestimmung der äquivalenten Branddauer eines natürlichen Brandes verwendet. Die Feststellung der äquivalenten Branddauer erfolgt in der Art, daß das Temperaturmaximum des natürlichen Brandes am Indikatorbauteil auf dem Temperatur-Zeit-Verlauf unter Normbrandbeanspruchung aufgesucht wird, wodurch der zugehörige Zeitpunkt der äquivalenten Branddauer bestimmt ist.

In Bild 2.4 ist die Bestimmung der äquivalenten Branddauer nach dem Temperaturkriterium schematisch dargestellt.

3. Zusammenfassung

Das vorliegende Rechenmodell zur Ermittlung von Brandraumtemperaturen infolge eines natürlichen Brandablaufs in Gebäuden basiert auf den Massen- und Energiebilanzgleichungen der Brennstoffe. Die Bilanzgleichungen wurden erstmals von Kawagoe [3] in den fünfziger Jahren zur Bestimmung praxisnaher Brandabläufe benutzt. Seine Arbeiten werden inzwischen von verschiedenen Forschern ergänzt und weiter entwickelt.

Bei der Darstellung des Problems durch Massen- und Energiebilanzen wurde ein numerisches Rechenverfahren entwickelt. Mit diesem computergesteuerten Rechenprogramm traten keine Konvergenzschwierigkeiten im Zuge der Lösungsprozedur auf.

Das hier entwickelte Rechenverfahren wurde durch Versuchsergebnisse überprüft, die vor allem in Metz [17] und in Lyngby [18] durchgeführt worden sind. Die Rechnungen haben mit den Versuchsergebnissen eine gute Übereinstimmung gezeigt; in [4] ist ausführlich darüber berichtet worden.

Den vorliegenden theoretischen Arbeiten und Rechenverfahren kommt inzwischen einige Bedeutung zu, vor allem deshalb, weil die Standard-Temperaturkurve nicht immer die wirklichkeitsnahen Randbedingungen eines natürlichen Schadensfeuers wiedergibt. Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Traglastberechnungen erlauben eine sichere, aber auch wirtschaftliche brandschutztechnische Bemessung einzelner Bauwerke. Das vorliegende Wärmebilanzmodell wurde kürzlich für die brandschutztechnische Bemessung eines Sonderobjekts (neue Reichsbrücke Wien) eingesetzt. Hierüber werden die Autoren in einer weiteren Veröffentlichung ausführlich berichten.

4. Literatur

- [1] Lie, T.T.:
Fire and Buildings. Applied Science Publishers Ltd., London, 1972.
- [2] Kordina, K., Schneider, U.:
Baulicher Brandschutz im Industriebau - Stand der Erkenntnisse.
VGB Kraftwerkstechnik 59, Heft 2, Februar 1979.
- [3] Kawagoe, K.:
Fire Behaviour in Rooms.
Building Research Institut Report No. 27, Tokio, Sept. 1958.
- [4] Schneider, U., Haksever, A.:
Wärmebilanzberechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Rand-
bedingungen, CIB W 14/80/55 (D).
- [5] Ödeen, K.:
Theoretical Study of fire characteristics in enclosed Spaces.
Bulletin 10, Division of Building Construction, Royal Institute of
Technology, Stockholm 1963.
- [6] Magnusson, S.E., Thelandersson, S.:
Temperature-Time Curves of complete process of fire development.
Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building
Construction Series No. 65, Stockholm 1970.
- [7] Thomas, P.H., et al.:
Flashover and instabilities in fire behaviour .
National Bureau of Standards, Washington DC PD 114/78, 1978.
- [8] Babrouskas, V., Williamson, R.:
Past-Flashover compartment fires.
National Bureau of Standards, Report No. VCB FRG 75-1, Dec. 1975.
- [9] Waterman, T.E.; Pape, R.:
A Study of the development of room fires.
National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20 234.
- [10] Harmathy, T.Z.:
Fire Technol., 8,3 196 (1972); and Fire Technol., 8,4 326 (1972).

- [11] Quintiere, J.:
The growth of fire in building compartments.
National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, Apr. 5-6, 1976.
- [12] Tanaka, T.:
A Model on fire spread in Small Scale Building March 1978 (Tokyo).
- [13] Hasemi, Y.: Numerical calculation of the natural convection in
fire compartment.
Building Research Institute, Ministry of Construction, March 1978 (Tokyo).
- [14] Schmidt, E.:
Über die Anwendung der Differenzenrechnung auf technische Anheiz- und
Abkühlprobleme.
Beitrag zur technischen Mechanik und technischen Physik (Föppl-Fest-
schrift, Seite 1979/189). Springer-Verlag Berlin (1974).
- [15] Kordina, K., Schneider, U., Haksever, A., Klingsch, W.:
Zur Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen im Brandfall.
CIB W 1490/75 (D), SFB 148, Techn. Universität Braunschweig (1975).
- [16] Haksever, A.:
Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen
im Brandfall.
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen
Universität Braunschweig, Heft 35 (1977). Diss. TU Braunschweig 1977.
- [17] Arnault, P., et al.:
Rapport Experimental sur les Essais avec des Feux Naturels Executes
dans la petite Installation. Maizieres-Les-Metz, (Juin 1973).
- [18] Bøhm, B.:
Fully developed polyethylene and wood Compartment fires with
application to structural design.
Technical University of Denmark (1977).
- [19] Haksever, A., Kordina, K.:
Brandschutztechnische Bemessung der neuen Wiener Reichsbrücke.
CIB W 14/80/54 (D).